مقایسهٔ درصد تخلخل، ریزساختار و رفتار فشاریِ فوم‌های فولادی حاوی ۲ درصد وزنی مس و ۲ درصد وزنی فسفر*

حمید سازگاران [۱]   میلاد حجّتی [۲]   محمدرضا اکبری[۳]

چکیده

در این پژوهش، اثر افزودن ۲ درصد وزنی مس و ۲ درصد وزنی فسفر به‌صورت مجزّا بر درصد تخلخل، ریزساختار و رفتار مکانیکی فوم‌های فولادی حاوی ۰/۵ درصد وزنی کربن تولیدشده به روش متالورژی پودر و با استفاده از دانه‌های اوره به‌عنوان پُرکنندهٔ فضا مورد مطالعه قرار گرفت. پس از تولید فوم‌های فولادی، تعیین درصد تخلخل به روش اندازه‌گیری ابعادی، ارزیابی‌های ریزساختار توسّط مطالعات میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی و بررسی رفتار مکانیکی توسّط انجام آزمون فشار صورت گرفت. میانگین درصد تخلخل در فوم‌های حاوی ۲ درصد وزنی مس و ۲ درصد وزنی فسفر به ترتیب برابر ۷۵ و ۸۰ درصد است. در ارزیابی‌های میکروسکوپی، دو دسته متفاوت از سلول‌ها مشاهده شد که شامل سلول‌های ایجاد شده در اثر انحلال دانه‌های اوره و حفرات ایجاد شده در دیواره‌های سلول‌ها هستند. علاوه بر این، ضخامت دیواره سلول‌ها بین ۹۰ تا ۱۰۲ میکرون اندازه‌گیری شد. در منحنی‌های تنش -کرنش فشاری فوم‌های حاوی مس و فسفر ناحیهٔ پلاتو بسیار طولانی مشاهده شد. شایان یادآوری است که ناحیهٔ پلاتو در فوم‌های حاوی فسفر به‌صورت دندانه‌اره‌ای است که به شکست دیوارهٔ سلول‌ها ارتباط دارد.

واژه‌های کلیدی فوم فولادی، روش پُرکننده فضا، افزودن مس و فسفر، ناحیهٔ پلاتو.

Comparison on Porosity Percent, Microstructure and Compression Behavior of Steel Foams Containing 2 wt. % Cu and 2 wt. % P

H. Sazegaran   M. Hojati   M.R. Akbari

Abstract

In this work, the effects of addition of 2 wt. % Cu and 2 wt. % P on the porosity percent, microstructure, and mechanical properties of 0.5 wt. % C steel foams manufactured by powder metallurgy through urea granulates as space holder were separately investigated. After manufacturing steel foams, determination of porosity percent by dimensional measurement, microstructural evaluation through optical and scanning electron microscopes, and investigation of mechanical behavior by compression test were conducted. The average of porosity percent in steel foams with Cu and P are 75 and 80 percent, respectively. In microscopic evaluations, two types of cells were observed that consisted of the solved urea cells and pores in the cells walls. In addition, the thickness of the cells walls was approximately measured from 90 to 102 micron. In the compressive stress vs. strain curves of Cu and P added steel foams, a long plateau region was observed. It is noteworthy that plateau region in the P added steel foams was as teeth-saw shape that related to the fracture of cells walls.

Keywords Steel foam, Powder metallurgy, Space holder technique, Cu and P additives, Porosity percent, Plateau region.

---

* نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ ۹۶/۲/۱۰ و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ ۹۷/۵/۲۰ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران.   **Email**: h.sazegaran@qiet.ac.ir

(۲) مدیر تحقیق و توسعه شرکت متالورژی پودر مشهد.

(۳) دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران.

DOI:10.22067/ma.v31i1.64093

مقدمه

فوم‌های فلزی یا فلزات سلولی دسته‌ای جدید از مواد مهندسی هستند که به خاطر داشتن ویژگی‌های منحصربه‌فرد، در بسیاری از زمینه‌ها و فعّالیّت‌های پژوهشی و تکنولوژیکی اهمیّت می‌یابند [3-1]. چگالی پایین، تولید ساختارهای سبک‌وزن، ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی جالب‌توجّه و رفتار حرارتی و صوتی منحصربه‌فرد در فوم‌های فلزی موجب شده است که از این مواد بتوان در بسیاری از کاربردهای ویژهٔ صنعتی استفاده کرد [5-3]. باید در نظر داشت که در فوم‌های فولادی علاوه بر وجود ویژگی‌های منحصربه‌فرد فوم‌ها، ویژگی‌های جالب‌توجّه فولادها نیز بر عملکرد قطعهٔ نهایی مؤثر خواهد بود و جذّابیّت بیشتری ایجاد خواهد کرد [11-6].

در سال‌های اخیر، روش‌های متنوّعی به‌منظور تولید فوم‌های فلزی همانند فوم‌های آلومینیوم، منیزیم و مس ابداع و توسعه یافته است، امّا تولید فوم‌های فولادی با مشکلات فراوانی مواجه است که اغلب آن‌ها به بالا بودن دمای ذوب فولادها ارتباط پیدا می‌کند [8-6]. روش‌های پرکاربرد تولید فوم‌های فولادی شامل فناوری متالورژی پودر، استفاده از گوی‌های توخالی و روش لوتوس است. در روش متالورژی پودر اغلب پودرهای فلزی با یک عامل فوم‌ساز مخلوط می‌شوند و بعد از انجام فرآیند فشردن، تف‌جوشی صورت می‌گیرد [15-12]. در روش دوم، از گوی‌های توخالی فلزی یا سرامیکی به‌منظور تولید سلول‌ها در یک زمینه فلزی استفاده می‌شود [16,17]. باید در نظر داشت که در برخی موارد، از تف‌جوشی گوی‌های توخالی فولادی استفاده می‌شود [18,19]. در این روش اغلب فوم‌های سلول بسته تولید می‌شود و این در حالی است که در برخی موارد می‌توان فوم‌های دارای مخلوطی از سلول‌های باز و بسته نیز تولید کرد [20]. در روش لوتوس که به «گازار» نیز شهرت دارد، اغلب گاز هیدروژن به درون مذاب فولاد نفوذ داده می‌شود که در طی فرآیند انجماد، موجب تشکیل سلول‌ها می‌گردد[21,22]. باید توجّه داشت که این روش معمولاً منجر به تولید فوم‌هایی با سلول‌های بسته و چگالی نسبتاً بالا می‌شود[21].

البتّه باید در نظر داشت که روش‌های دیگری نیز به‌منظور تولید فوم‌های فولادی ابداع و گسترش یافته است [26-23]، امّا استفاده از پُرکننده‌های فضا در میان پودرهای فولادی و خروج پُرکننده‌ها بعد یا قبل از تف‌جوشی روشی جالب است [29-27]. شایان یادآوری است که استفاده از ذرّات کربوهیدرات و کرب‌آمید به‌عنوان پُرکننده در تولید فوم‌های آلومینیومی نیز امکان‌پذیر است [33-30]. علاوه بر این، دانه‌های پلی‌استیرن و ذرّات کرب‌آمید کروی و نامنظم به‌عنوان پُرکننده فضا به‌منظور تولید فوم‌های فولادی به کار برده شده‌اند [٣٤ و ٣٥]. البتّه، دانه‌های بی‌کربنات آمونیوم [36,37]، کرب‌آمید [38]، سنواسفر [39]، نمک طعام [40]، ساکارز [41,42] به‌منظور پُرکنندهٔ فضا در تولید فوم‌های فولاد زنگ‌نزن به کار برده شدند. باوجوداین‌که مطالعات فراوانی بر روی نحوهٔ تولید فوم‌های فولادی به روش پُرکنندهٔ فضا صورت گرفته است، امّا مطالعات چندانی در زمینهٔ تأثیرات عناصِر آلیاژی بر رفتار فوم‌های فولادی در دست نیست. در این پژوهش، فوم‌های فولادی به روش متالورژی پودر و با استفاده از دانه‌های اوره به‌عنوان پُرکنندهٔ فضا تولید شدند و اثر افزودن ٢ درصد وزنی مس و ٢ درصد وزنی فسفر بر میزان تخلخل، رفتار فشاری و ریزساختار مورد مطالعه قرار گرفت.

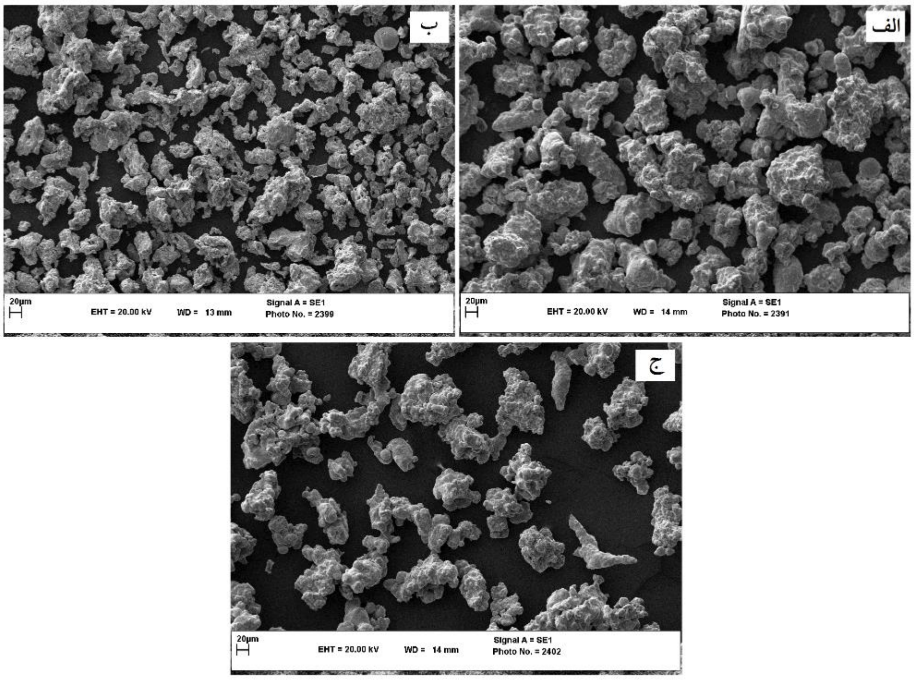
مواد و روش انجام آزمون‌ها

مواد اولیّه

در این پژوهش، تولید فوم‌های فولادی به روش متالورژی پودر مبتنی بر استفاده از پُرکننده‌های فضا صورت گرفت. بدین منظور، از مخلوطی از پودرهای فلزی و پُرکنندهٔ فضا استفاده شد. پودرهای مورد استفاده شامل پودر آهن (٩٩/٩ درصد وزنی آهن)، پودر مس (٩٩/٩ درصد وزنی مس)، پودر فسفید آهن (١٣/٥ درصد وزنی فسفر و باقی‌مانده آهن) و پودر گرافیت (٩٩/٩٩ درصد وزنی کربن) است که همهٔ آن‌ها تجاری هستند و از شرکت متالورژی پودر مشهد تهیه شده‌اند. توزیع ذرّات پودر آهن به این‌گونه است که ٣ درصد وزنی

بین ١٦٠ تا ٢٠٠ میکرون، ٣٠ درصد وزنی بین ١٠٠ تا ١٦٠ میکرون، ٣١ درصد وزنی بین ٦٣ تا ١٠٠ میکرون و ٣٦ درصد کوچک‌تر از ٦٣ میکرون است. علاوه بر این، توزیع ذرّات پودر مس و ذرّات پودر فسفید آهن بین ٤٥ تا ١٠٠ میکرون و پودرهای گرافیت از نوع UF (با توزیع ذرّات کوچک‌تر از ١ میکرون) است. در شکل (١)، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از پودرهای آهن، مس و فسفید آهن نمایش داده شده است.

به‌منظور تولید فوم‌های فولادی، سه دسته متفاوت از مخلوط‌های پودری متفاوت تهیه شد که ترکیب شیمیایی آن‌ها و نحوه نام‌گذاری نمونه‌های تولیدی در جدول (١) ارائه شده است. قابل‌ذکر است که در مخلوط پودری نمونه C مقدار ١٤/٨ درصد وزنی از فسفید آهن (حاوی ١٣/٥ درصد فسفر) اضافه شد تا این‌که مقدار نهایی فسفر به ٢ درصد وزنی برسد. هر سه نمونه پودری تهیه شده به مدّت ٣٠ دقیقه درون یک مخلوط‌کن مخصوص متالورژی پودر مخلوط شدند. باید در نظر داشت که سرعت چرخش مخلوط‌کن برابر ١٥٠ rpm انتخاب شد. دانه‌های اوره (٩٩/٩٩ درصد وزنی) مورد استفاده به‌منظور پُرکننده فضا از شرکت مرک آلمان خریداری شدند و میانگین قطر آن‌ها برابر ١/٥ mm و به‌صورت کروی هستند.



شکل (١) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از؛ الف) پودر آهن، ب) پودر مس و ج) فسفید آهن

جدول (١) ترکیب شیمیایی مخلوط‌های پودری تهیه‌شده و نحوهٔ نام‌گذاری نمونه‌های تولیدی

نمونه	کربن (درصد وزنی)	مس (درصد وزنی)	فسفر (درصد وزنی)	آهن (درصد وزنی)
A	٠/٥	---	---	باقی‌مانده
B	٠/٥	٢	---	باقی‌مانده
C	٠/٥	---	٢	باقی‌مانده

تولید فوم‌های فولادی

در این پژوهش، تولید فوم‌های فولادی به روش متالورژی پودر و با استفاده از پُرکننده‌های فضا صورت گرفت که شامل چهار مرحله است. این مراحل عبارت‌اند از: الف) پوشش دهی دانه‌های اوره توسّط مخلوط‌های پودری، ب) فشردن دانه‌های اورهٔ پوشش یافته، ج) انحلال اوره توسّط آب، د) فرآیند تف‌جوشی است.

فرآیند پوشش دهی. فرآیند پوشش دهی اوّلین مرحله در تولید فوم‌های فولادی است. در این مرحله، مخلوط‌های پودری بر روی دانه‌های اوره پوشش داده می‌شوند. فرآیند پوشش دهی درون یک محفظهٔ استوانه‌ای در حال چرخش با سرعت ۱۵۰ rpm و به مدّت ۳ دقیقه انجام شد. هرکدام از مخلوط‌های پودری به مقدار ۵۰ گرم و دانه‌های اوره به مقدار ۵۰ گرم (نسبت یک‌به‌یک مخلوط پودری و اوره) درون محفظه قرار گرفتند و ۲ گرم آب به‌عنوان چسب به درون محفظه اضافه شد. در هنگام تماس آب با سطوح دانه‌های اوره در طی فرآیند چرخش، سطوح دانه‌های اوره چسبنده شده و درنتیجه، ذرّات مخلوط‌های پودری به سطوح دانه‌های اوره می‌چسبند. پس از پوشش دهی دانه‌های اوره توسّط مخلوط‌های پودری، فرآیند خشک‌کردن توسّط یک آوِن در دمای ۷۰ °C و به مدّت ۵ ساعت انجام شد. درنهایت، دانه‌های اوره خشک و پوشش یافته توسّط مخلوط‌های پودری تولید شدند.

فرآیند فشردن. به‌منظور تولید نمونه‌های پیش‌ماده فومی از فشردن دانه‌های اوره پوشش یافته توسّط یک قالب فلزی و یک پرس هیدورلیک استفاده شد. جنس قالب فولاد ۱۰٤۵ و سنبه استفاده شده از جنس فولاد تندبُر است. قالب فولادی دارای یک حفره استوانه‌ای شکل با ارتفاع ۲۰۰ mm و قطر داخلی ۱۰ mm است. لازم به توضیح است که سنبهٔ استفاده شده دارای قطر خارجی ۱۰ mm و طول ۳۰۰ mm است. پرس هیدرولیک مورد استفاده دارای ظرفیت ۵۰ تن و مجهز به گیج اندازه‌گیری فشار است. در فرآیند فشردن، دانه‌های اوره پوشش یافته درون حفره قالب ریخته شدند و سپس، فرآیند فشردن تا فشار اعمالی ۲۰۰ MPa صورت گرفت. باید توجّه داشت که در صورت اعمال فشار بیشتر از ۲۰۰ MPa، دانه‌های می‌شکنند که این رخداد در پژوهش بِکوز و همکارانش [43] نیز گزارش شده است. علاوه بر این، درصورتی‌که فشار اعمالی کمتر از ۲۰۰ MPa باشد، استحکام پیش‌ماده فومی کم است و در طی فرآیند انحلال تخریب خواهد شد.

فرآیند انحلال دانه‌های اوره. پس از فشردن دانه‌های اوره پوشش یافته توسّط پرس هیدرولیک باید فرآیند انحلال دانه‌های اوره توسّط آب، به‌منظور خروج اوره از پیش‌ماده فومی صورت گیرد. در این فرآیند، از آب مقطر با دمای °C ۳۰ استفاده شد. نمونه‌های پیش‌ماده فومی درون آب مقطر به مدّت ۱ دقیقه قرار داده شدند. سپس خشک شدن درون هوا به مدّت ٤ ساعت صورت گرفت. درنتیجه، مقداری از اوره درون آب انحلال یافت. این فرآیند ۵ مرتبه به‌صورت متوالی انجام شد و درنهایت، مقدار زیادی از اوره استفاده شده خارج گردید. باید در نظر داشت که در صورت باقی ماندن مقادیر کمی از دانه‌های اوره، فرآیند تجزیه در طی عملیات تف‌جوشی منجر به خروج اوره باقیمانده خواهد شد. مطابق با پژوهش بِکوز و همکارانش [43] و همچنین مشاهدات صورت گرفته، اگر فرآیند انحلال دانه‌های اوره توسّط آب به‌کلّی صورت نگیرد، تجزیه حرارتی اوره در طی فرآیند تف‌جوشی منجر به تشکیل مقادیر زیادی گاز و درنتیجه، تخریب نمونه‌های پیش‌ماده فومی می‌گردد.

فرآیند تف‌جوشی. آخرین مرحله در تولید فوم های فولادی، تف‌جوشی است که در طی آن، ذرّات پودر به یکدیگر اتصال می‌یابند. این فرآیند توسّط کوره‌های تونلی مخصوص متالورژی پودر صورت گرفت. کورهٔ مورد استفاده دارای سه منطقه دمایی است که تغییرات دمای درون کوره بر حسب زمان در جدول (۲) ارائه شده است. باید در نظر داشت که در منطقهٔ دوم، دما به‌سرعت به ۱۱۲۰ °C

افزایش می‌یابد و اتصـــال ذرّات پودری به یکدیگر یا فرآیند تف‌جوشـــی در این منطقه دمایی صـــورت می‌گیرد. قابل‌ذکر ا ست که اتم سفر کوره آمونیاک شک سته ا ست و با افزودن مقداری نیتروژن اغلب ترکیب شـــیمیایی گاز درون محفظهٔ کوره بین ۱۰ تا ۲۰ درصد حجمی هیدورژن و بین ۸۰ تا ۹۰ درصد حجمی نیتروژن دارد. پس از خروج نمونه‌ها از کوره، فوم‌های فولادی تولید شـــدند. لازم به یادآوری اســـت که از هر دسته از فوم‌های فولادی به تعداد ۵۰ نمونه تهیه شد.

جدول (۲) تغییرات دمایی درون کوره بر حسب زمان

نام منطقهٔ دمایی	تغییرات دما (°C)	زمان (min)
اوّل	۰–۶۰۰	۷۰
دوم	۶۰۰–۱۱۲۰	۵۰
سوم	۱۱۲۰–۲۵	۱۲۰

تعیین میزان تخلخل

چگالی و درصد تخلخل فوم‌های تولیدی به روش اندازه‌گیری ابعاد و توزین تعیین شدند. در تعیین چگالی فوم‌های فولادی تولید شده از معادله (۱) و به‌منظور تعیین درصد تخلخل آن‌ها از معادلهٔ (۲) استفاده شد [44]. قابل‌ذکر است که در معادلهٔ (۲)، چگالی جامد همان چگالی فولاد بدون تخلخل برابر $7/8\ g/cm^3$ در نظر گرفته شد.

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{1}$$

$$P\% = \left[1 - \left(\frac{\rho_F}{\rho_S}\right)\right] \times 100 \tag{2}$$

در معادلات فوق، ρ چگالی، m جرم، V حجم، P% در صد تخلخل، ρ_F چگالی قطعه فومی و ρ_S چگالی جامد یا چگالی فولاد بدون تخلخل است.

ارزیابی ریزساختاری

ارزیابی‌های ریزساختاری صورت گرفته بر روی فوم‌های تولیدی شامل مطالعات میکروسکوپ نوری (OM) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) است. فوم‌های تولید شده ابتدا توسّط وایر کات در جهت عمود به محور برش داده شدند و سپس، فرآیندهای مانت گرم، سنباده‌زنی و پولیش‌کاری بر روی آن‌ها صورت گرفت. فرآیند حکاکی توسّط محلول نایتال ۲ درصد و به مدّت ۵ دقیقه صورت گرفت. بعد از انجام ارزیابی‌های میکروسکوپ الکترونی، نمونه‌های تهیه شده توسّط آلیاژ Au-Pd و با دستگاه Sputter Coater SC7620 پوشش دهی شدند و سپس، مطالعات میکروسکوپ الکترونی روبشی توسّط LEO 1450VP انجام شد. علاوه بر این، برای شناسایی ترکیب شیمیایی فازهای گوناگون از اسپکتروسکوپی اشعهٔ ایکس تولید شده توسّط پرتو الکترونی (EDS) استفاده شد. شایان یادآوری است که پردازش تصاویر میکروسکوپی توسّط نرم‌افزار MIP صورت گرفت.

بررسی رفتار فشاری

آزمون فشـــار فوم‌های فولادی تولید شـــده توســـّط دســـتگاه Zwick مدل Z250 انجام شـــد. فوم‌های تولید شـــده توســـّط دســـتگاه وایرکات در جهت عمود بر محور به‌گونه‌ای بریده شدند که نمونه‌ای ا ستوانه‌ای شکل با قطر ۱۰ mm و ارتفاع ۱۵ mm تولید شـــد. روان‌کاری بین فک و نمونه‌ها توســـّط روغن‌کاری صورت گرفت. سرعت حرکت فک‌ها در آزمون فشار برابر ۲ mm/min انتخاب شد.

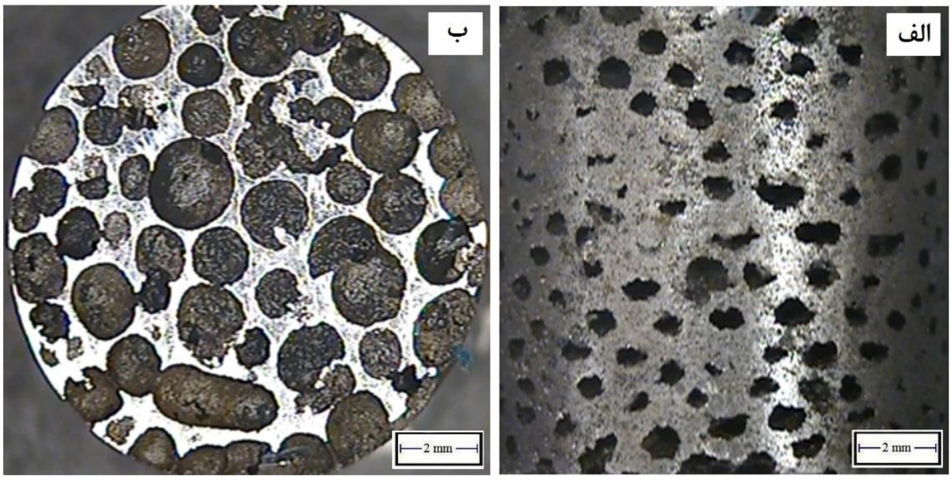
نتایج و بحث

سلول‌ها و دیواره‌ها

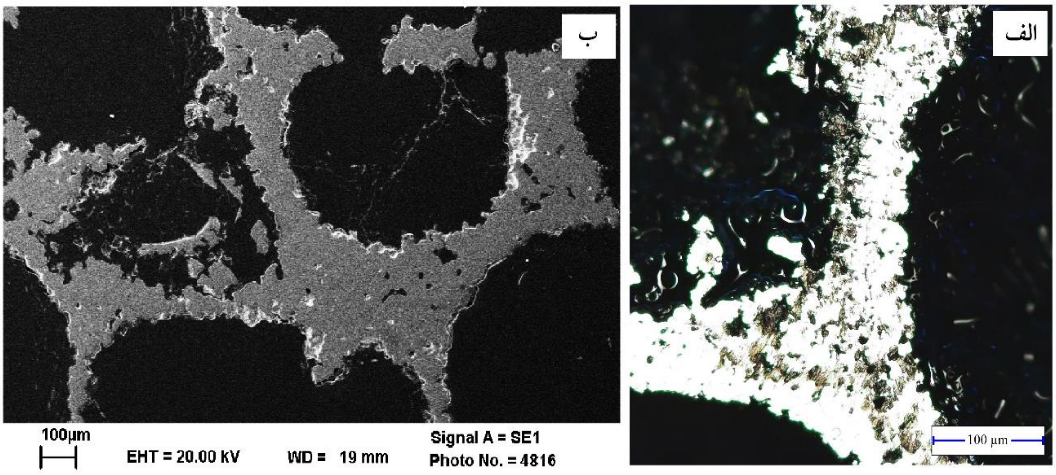
مطابق با بازرسی‌های چشمی صورت گرفته بر روی نمونه‌های تولیدی، نمونه‌های A که ترکیب شیمیایی آن فقط دارای ۰/۵ درصد وزنی کربن است، دارای معایب زیادی در دیواره‌های خارجی هستند. این معایب شامل حفرات و شکستگی‌ها می‌باشند که تخریب دیواره‌های خارجی احتمالاً به کم بودن استحکام آن‌ها ارتباط دارد. این در حالی است که نمونه‌های C و نمونه‌های B اغلب به‌صورت کامل و بدون عیب در سطوح خارجی تولید شده‌اند. در شکل (۲)، تصاویر نوری از نمای جانبی و بالایی یک نمونه از فوم‌های B نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سلول‌ها توسّط دیواره‌ها به‌صورت کامل احاطه شده‌اند و یک ساختار کاملاً

سلولی تشکیل شده است. تشکیل سلول‌ها به خروج دانه‌های اوره از پیش‌ماده فومی در فرآیند انحلال ارتباط پیدا می‌کند و دیواره‌های سلول‌ها بر اساس تف‌جوشی و اتصال پودرهای پوشش داده شده بر روی دانه‌های اوره شکل می‌گیرند. قابل‌ذکر است که در نمونه‌های A و C نیز چنین ساختار سلولی شکل گرفته است.

در شکل (۳)، تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی از دیواره سلول‌ها نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در طی فرآیند تولید هیچ‌گونه شکستی در دانه‌های اوره رخ نداده است و سلول‌ها اغلب به‌صورت کروی هستند. فقط در برخی قسمت‌ها دیواره بین سلول‌ها به‌صورت کامل تشکیل نشده است و دو سلول به یکدیگر متصل شده‌اند. این امر احتمالاً به نقص در فرآیند پوشش دهی دانه‌های اوره توسّط مخلوط پودری، تخریب پوشش تشکیل دهنده دیواره‌ها در فرآیندهای فشردن و یا خروج نامناسب اوره توسّط جریان آب در طی فرآیند انحلال ارتباط پیدا می‌کند.



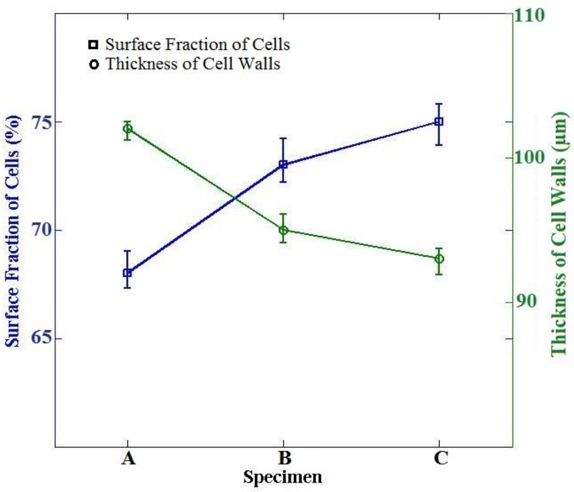
شکل (۲) نمای الف) جانبی و ب) بالایی نمونه‌ای از فوم‌های B



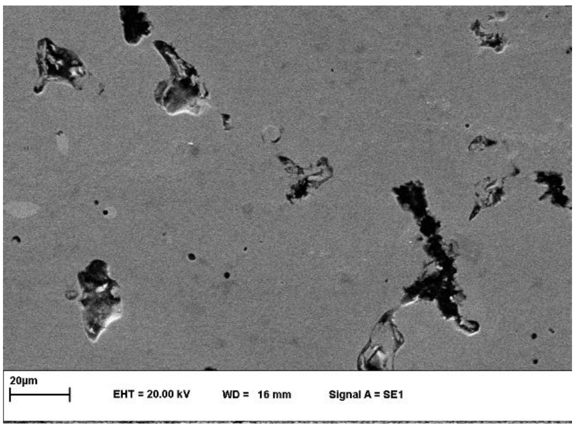
شکل (۳) تصاویر میکروسکوپ الف) نوری و ب) الکترونی روبشی از سلول‌ها و دیواره‌های نمونه‌ای از فوم‌های C

علاوه بر این، توزیع سلول‌ها تقریباً به‌صورت یکنواخت است و ضخامت دیواره‌ها نیز تقریباً یکسان است. شکل (۴)، نتایج به‌دست‌آمده از پردازش تصاویر میکروسکوپی در مورد کسر سطحی سلول‌ها و ضخامت دیواره‌ها را نشان می‌دهد. قابل‌ذکر است که اندازه‌گیری ضخامت دیواره‌ها فقط در قسمت‌های میانی صورت گرفته است و ضخامت دیواره‌ها در محل اتصال چند سلول به یکدیگر اندازه‌گیری نشده است. مطابق با شکل (۴)، نمونه A کمترین کسر سطحی سلول‌ها و نمونه C بیشترین کسر سطحی سلول‌ها را دارند. البتّه، کسر سطحی سلول‌ها در نمونه‌های B و C اختلاف چندانی را نشان نمی‌دهد. در نمونه‌های B (با ۲ درصد وزنی مس) و C (با ۲ درصد وزنی فسفر)، فرآیند تف‌جوشی حالت مذاب رخ می‌دهد. این امر موجب می‌گردد که مذاب تشکیل شده در بین ذرّات آهن (تشکیل دهنده دیواره سلول‌ها) قرار بگیرد و اتصالات بهتری تشکیل شود [45-47]. درنتیجه، بر اثر بهبود یافتن اتصال ذرّات مخلوط پودری تشکیل‌دهنده دیواره سلول‌ها، ضخامت دیواره‌ها کاهش و کسر سطحی سلول‌ها افزایش می‌یابد. علاوه بر این مشاهده می شود که ضخامت دیواره سلول‌ها نیز در نمونه‌های حاوی مس و فسفر افزودنی کمتر است که این پدیده نیز می‌تواند به تف‌جوشی حالت مذاب ارتباط پیدا کند. البتّه باید در نظر داشت که تأثیر افزودن ۲ درصد وزنی فسفر نسبت به ۲ درصد وزنی مس بیشتر است. این مسئله را می‌توان به مقدار بیشتر فسفید آهن (افزودن ۱۴/۸ درصد وزنی از فسفید آهن حاوی ۱۳/۵ درصد وزنی فسفر به‌منظور ایجاد ۲ درصد وزنی فسفر) در مقایسه با ۲ درصد وزنی مس ارتباط داد.

در شکل (۵)، یک تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح دیواره سلول‌های نمونه‌ای از فوم‌های B نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دیواره سلول‌ها نیز دارای حفراتی هستند که به‌صورت پراکنده توزیع یافته‌اند. باید در نظر داشت که تشکیل این حفرات به فرآیند متالورژی پودر ارتباط پیدا می‌کند. کاهش اندازه ذرّات مخلوط پودری به کار برده شده، افزایش میزان فشار در فرآیند فشردن، افزایش دما و همچنین زمان فرآیند تف‌جوشی احتمالاً منجر به کاهش میزان حفرات تشکیل شده در دیواره سلول‌ها خواهد شد [48]. میانگین طول حفرات تشکیل شده در دیواره سلول‌های فوم‌های A، B و C که توسّط نرم‌افزار MIP بر روی ۱۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی اندازه‌گیری شده است، به ترتیب برابر ۲۴، ۲۲/۵ و ۲۱ میکرون است.



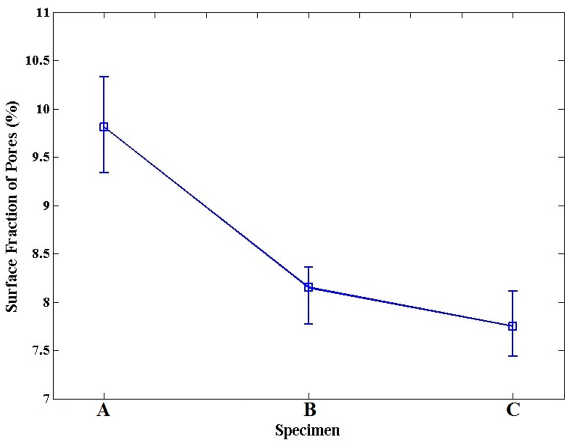
شکل (۴) کسر سطحی سلول‌ها و ضخامت دیواره سلول‌ها بر اساس پردازش ۱۵ تصویر میکروسکوپی توسّط نرم‌افزار MIP



شکل (۵) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح دیوارهٔ سلول از یک نمونه از فوم‌های B

علاوه بر این، کسر سطحی حفرات تشکیل شده در دیواره سلول‌ها که توسّط نرم‌افزار MIP تعیین شده است،

در شکل (٦) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار حفرات در دیواره سلول‌های فوم‌های A که بدون افزودنی مس و فسفر هستند، تشکیل شده است. فوم‌های حاوی ۲ در صد افزودنی مس و فسفر دارای مقدار حفرات نسبتاً مشابهی هستند، هرچند که مقدار حفرات در دیواره سلول‌های فوم‌های C کمترین مقدار را نشان می‌دهد. احتمالاً کاهش حفرات در دیواره سلول‌های فوم‌های B و C به بهبود اتصال ذرّات مخلوط پودر مورد استفاده به‌منظور تولید فوم‌های فولادی ارتباط پیدا می‌کند. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، پدیده تف‌جوشی حالت مایع در فوم‌های B و C صورت می‌گیرد و درنتیجه، میزان حفرات تشکیل شده در دیواره سلول‌ها کاهش خواهد یافت.



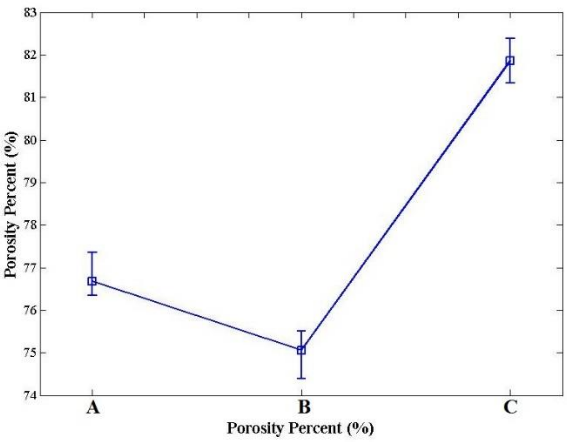
شکل (٦) کسر سطحی حفرات تشکیل شده در دیواره سلول‌ها

میزان تخلخل

میزان تخلخل یکی از مهم‌ترین ویژگی های فوم ها و مواد سلولی محسوب می‌شود که بر رفتار مکانیکی و درنتیجه، عملکرد محصول نهایی مؤثر خواهد بود [1-3]. در شکل (۷)، میزان تخلخل اندازه‌گیری شده در فوم‌های تولیدی (مطابق با معادله (۲)) به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین و کمترین میزان تخلخل به ترتیب مربوط به نمونه‌های C و B است. این روند تغییرات میزان تخلخل احتمالاً به چگالی پایین فسفر افزودنی و چگالی بالای مس افزودنی ارتباط پیدا می‌کند. در کل، تخلخل‌های موجود در فوم‌های تولیدی به دو دسته تقسیم می‌شوند که شامل الف) سلول‌های تشکیل شده در اثر انحلال دانه‌های اوره و ب) حفرات تشکیل شده در بین ذرّات اتصال یافته مخلوط پودری در دیواره سلول‌ها هستند. بنابراین، میزان تخلخل فوم‌های فولادی را می‌توان از مجموع کسر سطحی سلول‌ها و کسر سطحی حفرات تشکیل شده در دیواره سلول‌ها، مطابق با معادله زیر محاسبه کرد.

$$P_C\% = SF_{Cells} + \left[\left(1 - SF_{Cells}\right) \times SF_{cells\ walls}\right] \quad (۳)$$

که در معادله فوق، $P_C\%$ درصد تخلخل محاسبه شده، SF_{Cells} کسر سطحی سلول‌ها و $SF_{cells\ walls}$ کسر سطحی حفرات تشکیل شده در دیواره سلول‌ها است. نتایج به‌دست‌آمده از محاسبات انجام شده در مورد میزان تخلخل و اختلاف بین میزان تخلخل اندازه‌گیری شده و میزان تخلخل محاسبه شده فوم‌های تولیدی در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین و کمترین میزان تخلخل محاسبه شده به فوم‌های C و A ارتباط پیدا می‌کند. بیشترین مقدار اختلاف بین میزان تخلخل‌ها در فوم‌های A مشاهده می‌شود. تشکیل عیوب بسیار زیاد بر روی سطوح خارجی این دسته از فوم‌ها می‌تواند دلیل اصلی اختلاف بین میزان تخلخل اندازه‌گیری شده و محاسبه شده باشد. در فوم‌های B، اختلاف بین میزان تخلخل‌ها به‌صورت منفی است که به افزودن مس با چگالی زیاد در این فوم‌ها ارتباط پیدا می‌کند. باید در نظر داشت که کمترین اختلاف بین میزان تخلخل‌ها در فوم‌های C مشاهده می‌شود.



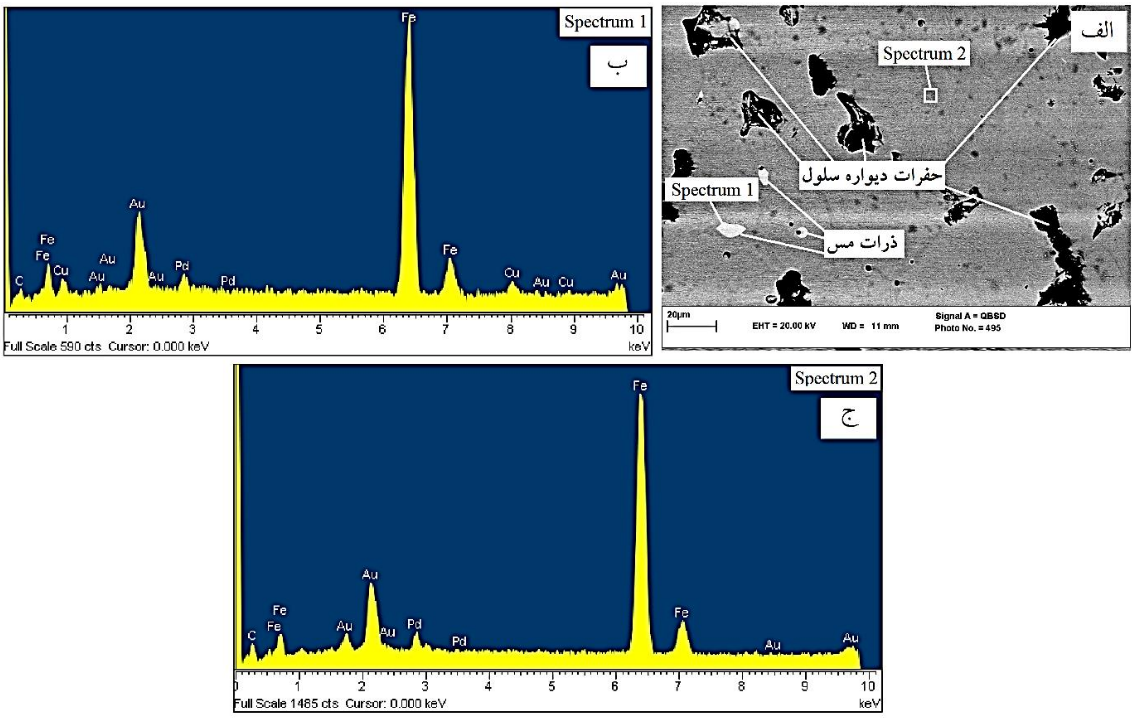
شکل (۷) میزان تخلخل در فوم‌های تولیدشده

جدول (۳) میزان تخلخل محاسبه شده و اختلاف بین میزان تخلخل‌ها در مورد فوم‌های تولیدی

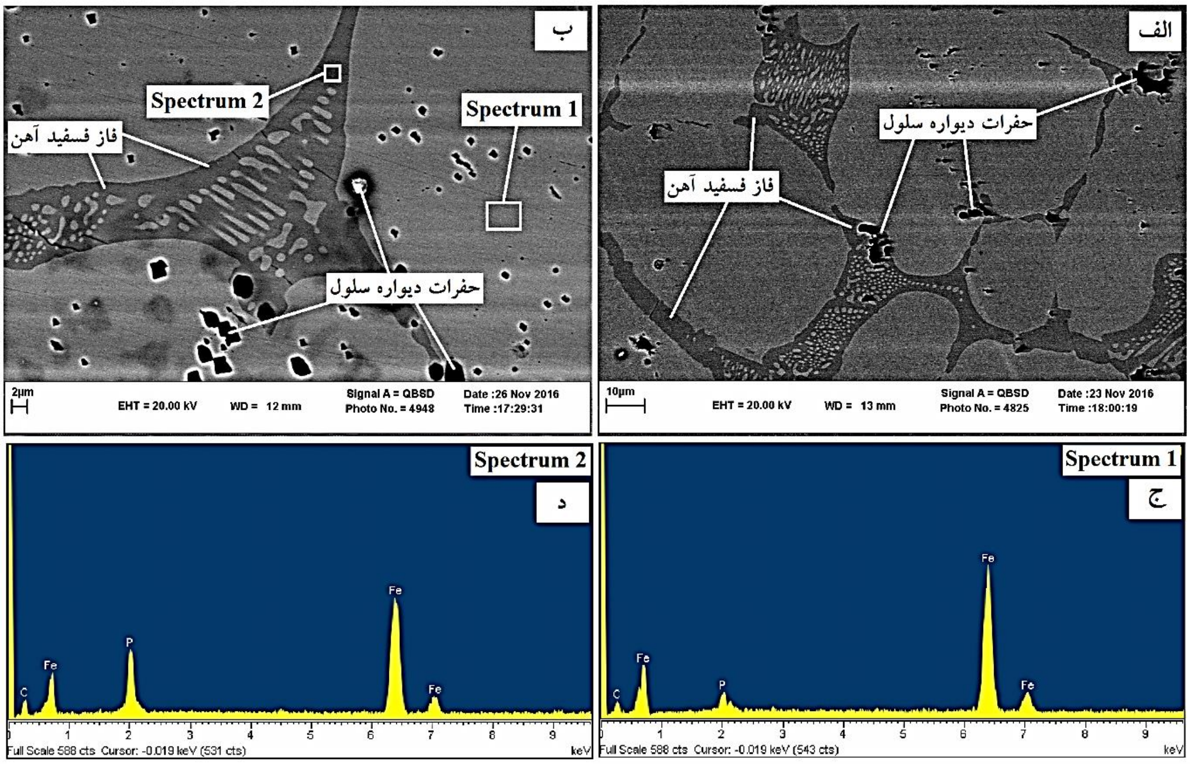
نمونه	میزان تخلخل محاسبه شده (٪)	درصد اختلاف بین میزان تخلخل‌ها $(E = \frac{P\% - Pc\%}{P\%} \times ۱۰۰)$
A	۷۱/۱۳	۷/۲۳
B	۷۸/۹٤	−۵/۱٦
C	۸۰/۸۱	۱/۲۸

ارزیابی ریزساختاری

در شکل (۸)، یک تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نتایج به‌دست‌آمده از آنالیزهای اسپکتروسکوپی اشعهٔ ایکس تولید شـده توسـّط پرتو الکترونی (EDS) از یک نمونه از فوم‌های B ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می شود، ذرّات مس مورد اسـتفاده در مخلوط پودری در طی فرآیند تف‌جوشی ذوب شده و در فواصل ذرّات آهن قرار گرفته‌اند. درنتیجه، اتصال بهتر ذرّات به یکدیگر را به ارمغان می‌آورند [45,46]. این امر احتمالاً منجر به بهبود رفتار مکانیکی فوم‌های تولیدی خواهد شـد. قابل‌ذکر اسـت که تشـکیل پیک‌های مربوط به طلا و پالادیوم به پوشـش دهی نمونه‌ها توسـّط آلیـاژ Au-Pd ارتبـاط پیـدا می‌کنـد. تصـاویر میکروسـکوپ الکترونی روبشـی و نتایج به‌دسـت‌آمده از آنالیزهای اسپکترو سکوپی اشعه ایکس تولید شده توسّط پرتو الکترونی (EDS) از یک نمونه از فوم‌های C در شـکل (۹) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می شود، یک فاز جدید در ریز ساختار تشکیل شده است. بر اساس این‌که در این نمونه ۲ درصد وزنی فسفر اضافه شده است، فاز تشکیل شده احتمالاً فسفید آهن است که در شرایط تف‌جوشی ذوب می شود و منجر به تف‌جوشی حالت مایع می‌گردد. توزیع و پراکندگی بیشتر این فاز در مقایسه با مس افزودنی در فوم‌های B منجر به بهبود اتصـالات ایجاد شـده در بین ذرّات آهن می‌شـود و درنتیجه، بهبود رفتار مکانیکی فوم‌های تولیدی انتظار می‌رود. مطابق با نتایج به‌دسـت‌آمده از آنالیزهای اسپکتروسکوپی اشعه ایکس تولید شده توسّط پرتو الکترونی، فاز تشکیل شده دارای مقدار فسفر بیشتری است و بنابراین، تشکیل فسفید آهن در مرز ذرّات آهن تأیید می‌گردد.



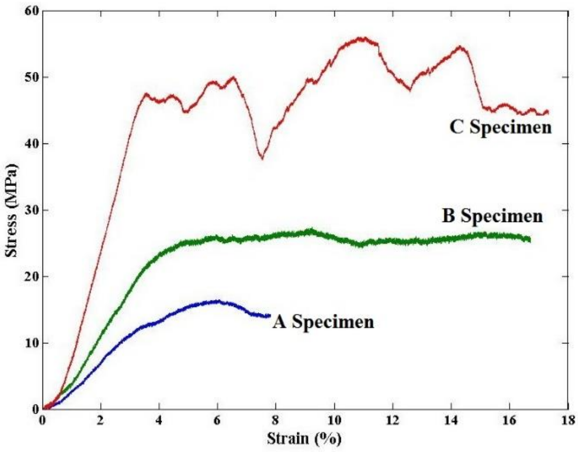
شکل (۸) الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌ای از فوم‌های B، ب) و ج) نتایج آنالیزهای EDS



شکل (۹) الف) و ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، ج) و د) نتایج آنالیزهای EDS یک نمونه از فوم‌های B

رفتار فشاری

ویژگی‌های مکانیکی فوم‌های فلزی و فلزات سلولی تأثیر به سزایی بر روی نحوه عملکرد قطعات ساخته شده از این دسته از مواد مهندسی خواهد داشت. البتّه، ویژگی‌های مکانیکی این دسته از مواد پیشرفته تحت تأثیر فلز یا آلیاژ سازنده دیواره‌ها، ریزساختار، عملیات حرارتی صورت گرفته بر روی فوم، مورفولوژی سلول‌ها، ضخامت دیواره‌ها و ... است [1-3]. در شکل (۱۰)، منحنی‌های تنش-کرنش مهندسی به‌دست‌آمده از آزمون فشار در مورد فوم‌های تولیدی ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه A پایین‌ترین منحنی و نمونه C بالاترین منحنی را به خود اختصاص داده‌اند. در فوم‌های A، به علت این‌که فرآیند تف‌جوشی به‌خوبی رخ نداده است، رفتار فشاری نامطلوبی مشاهده می‌شود. این در حالی است که در نمونه‌های B، عنصر مس موجود در مخلوط پودری (۲ درصد وزنی) منجر به بهبود اتصالات ذرّات پودر در طی فرآیند تف‌جوشی می‌گردد [45,46] و درنتیجه، رفتار فشاری بهتری را از خود نشان می‌دهد. درنهایت، وجود عنصر فسفر در نمونه‌های C تأثیر شدیدتری بر ایجاد اتصالات بهبودیافته دارد و رفتار فشاری این دسته از فوم‌ها در مقایسه با سایر فوم‌ها بهتر است. البتّه باید در نظر داشت که ۲ درصد فسفر موجب تشکیل مقدار بیشتری فسفید آهن (که موجب تف‌جوشی حالت مذاب می‌گردد) در مقایسه به ۲ درصد وزنی مس می‌شود.



شکل (۱۰) منحنی‌های تنش- کرنش فشاری فوم‌های تولیدی

قابل‌ذکر است که ناحیهٔ پلاتو در همه فوم‌های تولیدی مشاهده می‌شود، ولی ناحیهٔ پلاتو در فوم‌های A بسیار کوچک و در فوم‌های B و C بسیار طویل است. احتمالاً طویل بودن ناحیهٔ پلاتو در فوم‌های B و C نیز به اتصالات بهتر ذرّات پودری درنتیجه تف‌جوشی حالت مذاب در این فوم‌ها ارتباط پیدا می‌کند. در فوم‌های C، ناحیهٔ پلاتو به‌صورت دندانه‌اره‌ای به وجود آمده است که احتمالاً به شکستن دیواره سلول‌ها به علت ترد بودن فازهای تشکیل شده در ساختار دیواره‌ها همانند فسفید آهن ارتباط می‌یابد. باید در نظر داشت که بالابود میزان تخلخل در فوم‌های تولیدی موجب شده است که ویژگی‌های فشاری در مقایسه با فوم‌های فولادی تولیدی توسّط سایر محققان [43] کمتر باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، فوم‌های فولادی حاوی کربن، مس و فسفر به روش متالورژی پودر و با استفاده از دانه‌های اوره به‌عنوان پُرکننده فضا تولید شدند و ارزیابی‌های ریزساختاری و مطالعات تعیین رفتار فشاری منجر شد که نتایج زیر به دست آید.

۱. میزان تخلخل در فوم های تولیدی وابسته به مقدار دانه‌های اوره انحلال یافته و حفرات تشکیل شده در دیواره سلول‌ها است.
۲. افزودن ۲ درصد وزنی مس و ۲ درصد وزنی فسفر بر میزان تخلخل فوم‌های تولیدی مؤثر است.
۳. افزودن مس و فسفر منجر به بهبود اتصالات ذرّات پودری سازندهٔ دیوارهٔ سلول‌ها می‌گردد.
٤. فوم‌های حاوی فسفر بهترین رفتار فشاری را از خود نشان می‌دهد و این در حالی است فوم‌های حاوی مس در جایگاه دوم قرار دارند.
۵. ناحیهٔ پلاتو بسیار طویل در فوم‌های حاوی مس و فسفر مشاهده می‌گردد.

تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت مالی دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان با شماره پژوهانه ۹۵/۷۷۳۷ انجام شده است.

مراجع

1. Banhart, J., "Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams", *Progress Materials Science*, Vol. 46, pp.559-632, (2001).
2. Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W. and Wadley, H.N.G., "Metal Foams: A Design Guide", Butterworth–Heinemann, Massachusetts, pp. 41-125, (2000).
3. Degischer, H.P. and Kriszt, B., "Handbook of Cellular Metals, Production, Processing and Applications", Wiley–VCH/Verlag GmbH, Weinheim, Germany, pp. 14-252, (2002).
4. Song, H.W., Fan, Z.J., Gang, Y., Wang, Q.C. and Tobota, A., "Partition energy absorption of axially crushed aluminum foam-filled hat sections", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, pp. 2575–2600, (2005).
5. Motz, P.R., "Deformation behaviour of closed-cell aluminium foams in tension"’. Acta Materialia, Vol. 49, pp. 2463–2470 (2001).
6. Park, C. and Nutt, S.R., "PM synthesis and properties of steel foams", Materials Science and Engineering A, Vol. 288(1), pp. 111–8, (2000).

7. Smith, B.H., Szyniszewski, S., Hajjar, J.F., Schafer, B.W. and Arwade, S.R., "Steel foam for structures: a review of applications, manufacturing and material properties", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 71, pp. 1–10, (2011).
8. Park, C.R. and Nutt, S., "Effects of process parameters on steel foam synthesis", Materials Science and Engineering A, Vol. 297(1–2), pp. 62–68, (2001).
9. Muriel, J., Sanchez, R.A., Barona, M.W. and Sanchez, S.H., "Steel and gray iron foam by powder metallurgical synthesis", Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, Vol. S1(4), pp. 1435–1440, (2009).
10. Park, C. and Nutt, S.R, "Anisotropy and strain localization in steel foam", Materials Science and Engineering A, Vol. 299(1–2), pp. 68–74, (2001).
11. Park, C. and Nutt, S.R., "Strain rate sensitivity and defects in steel foam", Materials Science and Engineering A, Vol. 323, pp. 358–366, (2002).
12. Kaya, A.C. and Fleck, C., "Deformation behavior of open-cell stainless steel foams", Materials Science and Engineering A, Vol. 615, pp. 447-456, (2014).
13. Park, C. and Nutt, S.R., "Anisotropy and strain localization in steel foam", Materials Science and Engineering A, Vol. 299, pp. 68–74, (2001).
14. Park, C. and Nutt, S.R., "Strain rate sensitivity and defects in steel foam" Materials Science and Engineering A, Vol. 323, pp. 358–66, (2002).
15. Latorrea, N., Cazana, F., Sebastian, V., Royo, C., Romeo, E., Centeno, M.A. and Monzon, A., "Growth of carbonaceous nanomaterials over stainless steel foams. Effect of activation temperature", Catalysis Today, Vol. 273, pp. 41-49, (2016).
16. Friedl, O., Motz, C., Peterlik, H., Puchegger, S., Reger, N. and Pippan, R., "Experimental investigation of mechanical properties of metallic hollow sphere structures", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 39(1), pp.135–46, (2007).
17. Brown, J.A., Vendra, L.J. and Rabiei, A., "Bending properties of Al–steel and steel–steel composite metal foams", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 41(11), pp. 2784–2793, (2010).
18. Neville, B.P. and Rabiei, A., "Composite metal foams processed through powder metallurgy", Materials and Design, Vol. 29, pp. 388–396, (2008).
19. Szyniszewski, S.T., Smith, B.H., Hajjar, J.F., Schafer, B.W. and Arwade, S.R., "The mechanical properties and modeling of a sintered hollow sphere steel foam", Materials and Design, Vol. 54, pp. 1083-1094, (2014).
20. Rabiei, A. and Vendra, L.J., "A comparison of composite metal foam's properties and other comparable metal foams", Materials Letters, Vol.63, pp.533–536, (2009).
21. Hyun, S.K., Park, J.S., Tane, M. and Nakajima, H., "Fabrication of lotus-type porous metals by continuous zone melting and continuous casting techniques", MetFoam 2005, *4th International Conference on Porous*

Metals and Metal Foaming Technology, Japan Institute of Metals (JIMIC-4), Kyoto, Japan (2005).

22. Ikeda, T., Aoki, T. and Nakajima, H., "Fabrication of lotus-type porous stainless steel by continuous zone melting technique and mechanical property", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 36, pp.77–86, (2007).
23. Verdooren, A., Chan, H.M., Grenestedt, J.L., Harmer, M.P. and Caram, H.S., "Fabrication of low density ferrous metallic foams by reduction of ceramic foam precursors", *Journal of Materials Science*, Vol. 40, pp. 4333–4339, (2005).
24. Verdooren, A., Chan, H.M., Grenestedt, J.L., Harmer, M.P. and Caram, H.S., "Fabrication of low density ferrous metallic foams by reduction of chemically bonded ceramic foams", *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 89(10), pp. 3101–3106, (2005).
25. Tuchinsky, L., "Novel fabrication technology for metal foams", *Journal of Advanced Materials*, Vol. 37(3), pp. 60–65, (2005).
26. Kostornov, A.G., Kirichenko, O.V., Brodnikovskii, N.P., Guslienko, Y.A. and Klimenko. V.N., "High-porous materials made from alloy steel fibers: production, structure, and mechanical properties", Powder Metall Metal Ceramics, Vol. 47(5–6), pp. 295–298, (2008).
27. Surace, R., Filippis, L.A.C., Ludovico, A.D. and Boghetich, G., "Influence of processing parameters on aluminium foam produced by space holder technique", Materials and Design, Vol. 30, pp: 1878–1885, (2009).
28. Zhao, N.Q., Jiang, B., Du, X.W., Li, J.J., Shi, C.S. and Zhao, W.X., "Effect of Y2O3 on the mechanical properties of open cell aluminum foams", Materials Letter, Vol. 60, pp. 1665-1668, (2006).
29. Sun, D.X. and Zhao, Y.Y., "Phase changes in sintering of Al/Mg/NaCl compacts for manufacturing Al foams by the sintering and dissolution process", Materials Letter, Vol. 59, pp. 6-10, (2005).
30. Michailidis, N., Stergioudi, F., Tsouknidas, A. and Pavlidou, E., "Compressive response of Al-foams produced via a powder sintering process based on a leachable space-holder material", Materials Science and Engineering A, Vol. 528, pp. 1662–1667, (2011).
31. Hassani, A., Habibolahzadeh, A. and Bafti, H., "Production of graded aluminum foams via powder space holder technique", Materials and Design, Vol. 40, pp. 510–515, (2012).
32. Alizadeh, M. and Mirzaei-Aliabadi, M., "Compressive properties and energy absorption behavior of $Al–Al_2O_3$ composite foam synthesized by space-holder technique", Materials and Design, Vol. 35, pp. 419–424, (2012).
33. Bafti, H. and Habibolahzadeh, A., "Production of aluminum foam by spherical carbamide space holder technique-processing parameters", Materials and Design, Vol. 31, pp. 4122–4129, (2010).
34. Shimizu, T., Matsuzaki, K., Nagai, H. and Kanetake, N., "Production of high porosity metal foams using EPS beads as space holders", Materials Science and Engineering A, Vol. 558, pp. 343–348, (2012).
35. Bekoz, N. and Oktay, E., "Effects of carbamide shape and content on processing and properties of steel foams", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, pp. 2109-2116, (2012).

36. Ahmed, I., Faming, Z., Eileen, O. and Eberhard, B., "Processing of porous Ti and Ti5Mn foams by spark plasma sintering", Materials and Design, Vol. 32, pp. 146–153, (2011).
37. Mondal, D.P., Jain, H., Das, S. and Jha, A.K., "Stainless steel foams made through powder metallurgy route using NH4HCO3 as space holder", Materials and Design, Vol. 88, pp. 430–437, (2015).
38. Ilven, M. and Enve, O., "Influence of fluoride content of artificial saliva metal release from 17 to 4 PH stainless steel foam for dental implant applications", *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 29 (6), pp. 582–588, (2013).
39. Peroni, L., Scapin, M., Fichera, C., Lehmbus, D., Weise, J., Baumeister, J. and Avall, M., "Investigation of the mechanical behaviour of AISI 316L stainless steel syntactic foams at different strain-rates", Composites Part B, Vol. 66, pp. 430–442, (2014).
40. Golabgir, M.H., Ebrahimi-Kahrizsangi, R., Torabi, O., Tajizadegan, H. and Jamshidi, A., "Fabrication and evaluation of oxidation resistance performance of open-celled Fe(Al) foam by space-holder technique", Advanced Powder Technology, Vol. 25, pp. 960–967, (2014).
41. Jakubowicz, J., Admek, G. and Dewidar, M., "Titanium foam made with saccharose as space holder", *Journal of Porous Materials*, Vol. 20, pp. 1134-1141, (2013).
42. Ilven, M. and Enver, O., "Production and characterization of Cr–Si–Ni–Mo steel foams", *International Journal of Engineering Materials and Sciences*, Vol. 18, pp. 227–232, (2011).
43. Bekoz, N. and Oktay, E., "Effect of heat treatment on mechanical properties of low alloy steel foams", Materials and Design, Vol. 51, pp. 212-218, (2013).
44. Shaik dawood, A.K. and Mohamed Nazirudeen, S.S., "A Development of Technology for Making Porous Metal Foams Castings", *Jordan Journal of Mechanical Indusial Engineering*, Vol. 4, pp. 292-299, (2010).
45. Wong-Angel, W.D., Tellez-Jurado, L., Chavez-Alcala, J.F., Chavira-Martinez, E. and Verduzco-Cedeno, V.F., "Effect of copper on the mechanical properties of alloys formed by powder metallurgy", Materials and Design, Vol. 58, pp. 12-18, (2014).
46. Simchi, A., "Effect of C and Cu addition on the densification and microstructure of iron powder in direct laser sintering process", *Materials Letter*, Vol. 62, pp. 2840-2843, (2008).
47. Antsiferov, V.N., Shatsov, A.A. and Oglezneva, S.A., "Structure and properties of powder metallurgy phosphorous steels", Powder Metallurgy and Metal Ceramics, Vol. 38(3), pp. 162-165, (1999).
48. Datta, B.K., "Powder Metallurgy: An Advanced Technique of Processing Engineering Materials", PHI Learning, pp. 9-126, (2013).